

文章编号: 1000-8055(2004)01-0089-05

单级大小叶片轴流压气机流动分析

张永新, 邹正平, 严 明, 陈懋章

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 采用三维数值模拟手段, 对低速大小叶片轴流压气机内的流动进行了分析。结果表明压气机内存在强烈的非定常流动; 小叶片将大叶片通道分成的两个通道具有不同的流量和负荷, 通道之间的负荷分配对于流动的非定常性会产生较大影响; 小叶片的存在重新建立了大叶片通道内的压力平衡, 起到了控制大叶片表面的流动和压力分布的效果。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 大小叶片; 轴流压气机; 数值模拟; 非定常计算

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

Flow Analysis of a Single-Stage Axial Flow Compressor with Splitter Rotor

ZHANG Yong-xin, ZHOU Zheng-ping, YAN Ming,
CHEN Mao-zhang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate flow in a single-stage axial flow compressor with splitter rotor, numerical simulations were carried out by using a 3-D CFD code. The results show strong unsteady flow phenomena in the rotor passage, although the isentropic efficiency shows small change with respect to time. The analysis shows that differences of mass flow and pressure rise between the two splitter-split passages have significant influence on unsteady flow in the compressor stage. The presence of splitter reconstructs the balance of pressure in rotor passage, and controls the flow near rotor blade.

Key words: aerospace propulsion system; splitter; axial flow compressor; numerical simulations; unsteady calculation

大小叶片技术是提高压气机/风扇负荷的一种有效手段, 由 Wennerstrom^[1] 于 1974 年提出, 其基本思想是在气流最容易出现分离的转子通道后半部分, 局部增加小叶片, 这样既可以抑制气流分离, 又可以避免增加全弦长叶片引起的堵塞和效率下降。实验表明, 这种方案能够在很高的扩散因子条件下得到好的气动性能。但由于受到当时

计算技术水平的制约, 缺乏有效的分析手段, 设计的转子叶片表面压力分布不佳, 导致总性能仍低于设计指标。直到上世纪 90 年代初, 全三维计算数值模拟手段被引入到大小叶片的分析和设计中, 使得该项技术的研究得以突破^[2]。美国于 1988 年开始实施的 HPTET 计划将大小叶片技术列为提高压气机/风扇负荷、减少级数的主要措

收稿日期: 2003- 04- 28; 修订日期: 2003- 08- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50236020); 面上项目(50206002)

作者简介: 张永新(1972-), 男, 福建福州人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事叶轮机气动热力计算研究

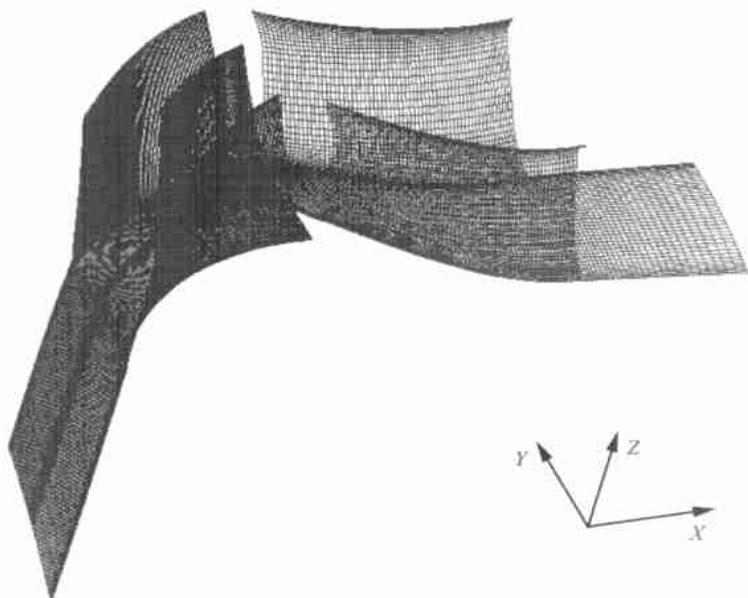


图 1 计算网格示意图

Fig 1 Computational mesh

施之一^[3,4]。研究大小叶片轴流压气机通道内定常和非定常的流动机理及特性,对于大小叶片的工程应用具有重要意义。目前,对大小叶片轴流压气机级的非定常流动的研究成果较少,本文通过三维数值模拟手段对一单级轴流压气机大小叶片进行了计算,并对大小叶片通道内的流动进行分析,表明大小叶片通道内存在较强烈的非定常流动,大小叶片对压气机通道内的流动具有不同的作用。

1 算例及数值模拟

算例为单级轴流压气机,其中转子由大小叶片排组成,转子大叶片、小叶片和静叶数目均为 18,计算的转子和静子通道数目为 1。转子大小叶片叶型为 NACA 65,大叶片根、中和尖部叶型弯角分别为 53° 、 26° 和 28.5° ;大小叶片中弧线分布一致,小叶片轴向长度为大叶片的 63%,平均半径处小叶片周向位于大叶片通道的 50% 处,在叶根部小叶片周向位置向大叶片压力面偏 1.8% 栅距,在叶尖部向大叶片吸力面偏 1.78% 栅距。压气机通道为等内外径通道半径处大叶片,轮毂比为 0.75,进口马赫数 0.2908,进口雷诺数 1.285×10^6 (特征长度基于平均半径处大叶片弦长),压升系数 $\Delta p^+ / [(1/2) \rho u_i^2]$ 为 0.91,其中 u_i 为动叶叶尖切线速度,转子转速为 3300 r/min。该轴流压气机是一个低速高负荷的压气机。

本文首先采用定常方法求解了单级压气机的

三维流场。数值模拟所采用的软件为 Fluent,网格用 Gambit 生成,为 H 型网格,网格节点数为 67.67 万(如图 1 所示)。计算方法采用了基于 SIMPLE 的非耦合隐式算法,湍流模型为混合长度模型,进口给定总压和总温,出口给定压力边界条件,转静子网格之间数据传递采用了掺混面模型;收敛准则为流量的相对残差低于 $1.0e-4$,并且要求进出口流量达到稳定平衡。在求解定常流场的基础上,本文还进一步求解了非定常流场。非定常计算以定常计算收敛得到的流场为初场,转静子网格之间数据传递采用了悬挂节点(Hanging node)的移动网格模型,时间差分为二阶隐式格式,取每 60 个时间步为一个计算周期(即转子扫过单个静子通道的时间),通过监测进口流量以及流场内给定点压力变化,当第 6 个计算周期的监测点压力和进口流量变化周期性(包括变化幅度和相位)与第 5 个计算周期的差别小于 1% 时,得知计算在第 6 个周期达到完全收敛。

2 计算结果分析和讨论

转子叶片通道都被小叶片分成两部分,为了后面讨论的方便,将小叶片吸力面和大叶片压力面构成的通道称为 A 通道,而小叶片压力面与大叶片吸力面之间的通道称为 B 通道。A 通道与 B 通道出口轴向截面积之比为 1.08。

图 2 给出了在一个非定常计算周期 T 内效率随时间变化的曲线,为时间平均的效率比定常

计算效率高 1.43%, 非定常计算时间平均级总压比为 1.143, 定常计算级总压比为 1.144, 两者较为接近, 这表明非定常时间平均流场的损失相对于定常计算要小。图 2 为非定常计算周期内流量时间变化曲线, 流量用定常流量无量纲化, 非定常流量变化幅度约为定常流量的 1.448%, 时间平均的流量比定常流量仅高 0.126%。图 3 表明压气机通道内存在较大的非定常流动, 图 2 说明在本文非定常流动条件下压气机效率能够稳定在一定水平, 非定常效率与定常效率之间的差别说明, 在压气机特性图中定常计算反映的压气机工作点并不在非定常工作点变化范围之内, 定常计算得到的流场不能代表非定常计算过程中任一时刻的

流动现象, 也就是说, 非定常流动不能视为一系列定常流动现象的简单叠加。

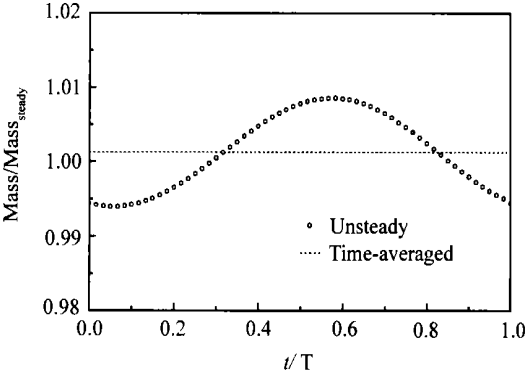


图 3 流量

Fig 3 Mass flow rate

图 4 给出了通道 A 和通道 B 流量与转子通道流量, 通道 A 和通道 B 流量之比, 以及通道 A 与通道 B 出口总压之比随时间的变化。非定常计算通道 A 的流量比通道 B 的流量大 3.4%至 7.8%; 非定常计算通道 A 与通道 B 出口的总压比值在 1.001 ± 0.013 之间变化。图 4 表明转子内被小叶片分成的两个通道, 具有不同的流量和负荷, 这种周向非均匀性是引起压气机通道内非定常流动的重要因素之一; 两个通道之间的流量分配受到下游静子位势作用而发生周期性变化, 并会引起通道出口总压的波动。

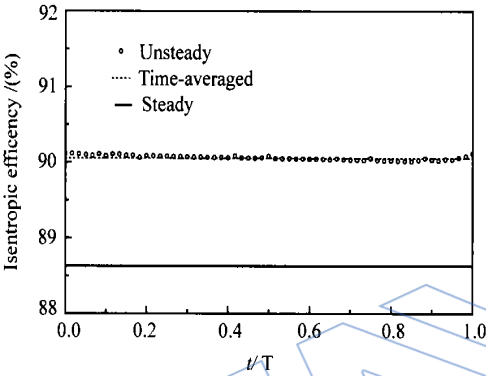


图 2 级效率

Fig 2 Isentropic efficiency

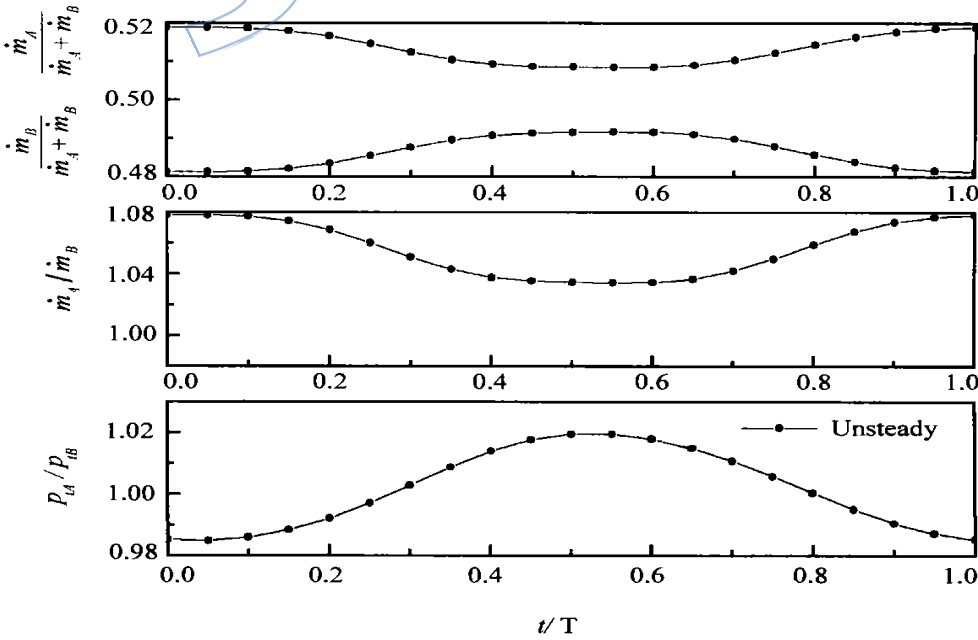


图 4 转子通道压力和流量变化

Fig 4 Total pressure ratio and mass flow rate ratio between splitter-split rotor passages

幅度大, 对于大小叶片分别而言周向力和轴向力变化的相位一致; 小叶片轴向力和周向力的变化幅度均比大叶片相应受力要略大, 大叶片与小叶片力的相位相反。

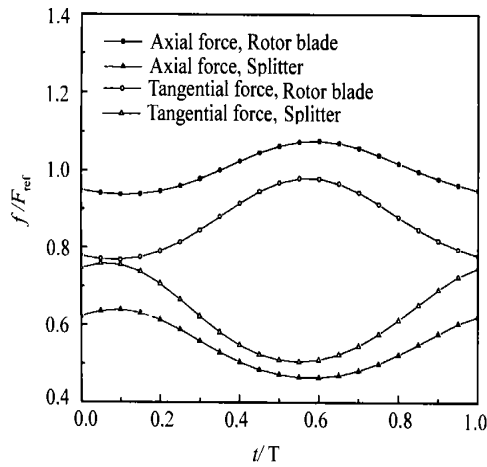


图 7 转子叶片受力

Fig 7 Force of rotor blades

由于大小叶片的切线速度是一样的, 所以大小叶片周向力之比反映了它们对气流做功之比。对于时间平均流场, 大小叶片周向力之比为 1.369, 定常计算得到的大小叶片周向力之比为 1.321。由此可见大叶片对气流做功是主要的, 而小叶片的主要作用在于组织大叶片通道内的流动, 建立新的压力平衡。

3 结 论

本文对大小叶片轴流压气机级进行了数值

模拟, 通过非定常计算与定常解的比较表明, 在本文算例中虽然非定常级效率变化较为平稳, 但是转子通道内存在着强烈的非定常流动。通过分析可以得到以下结论:

(1) 小叶片将大叶片通道分成两个通道, 具有不同的流量和负荷, 两个通道之间的负荷分配对于大小叶片轴流压气机通道内的非定常流动特性有很大影响。

(2) 大叶片的加功作用是占主要的, 小叶片的主要作用在于重新建立了大叶片通道内的压力平衡和流动机制, 小叶片可以控制大叶片表面的流动和压力分布。

致谢 本文的完成得到了中国科学院工程热物理研究所徐纲博士、张宏武博士和聂超群教授的帮助, 特此致谢。

参考文献

[1] Wennerstrom A J, Frost G R. Design of a Rotor Incorporating Splitter Vanes for a High Pressure Ratio Supersonic Axial Compressor Stage[R]. ARL - TR- 74- 0110, 1974

[2] Tzuoo K L. Optimization of a Highly-Loaded Axial Splitted Rotor Design[J]. Revue Francaise de M écanique 1992 (3): 235- 246

[3] Wennerstrom A J. Test of a Supersonic Axial Compressor Stage Incorporating Splitter Vanes in the Rotor[R]. ARL - TR- 75- 0165, 1975

[4] 陈懋章 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 1- 15